



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS KARAKTERISTIK FENOMENA *PRE-BREAKDOWN*
VOLTAGE BERBASIS PENGUJIAN PADA MEDIA ISOLASI
CAIR, MINYAK JAGUNG**

Eber Wonda
NRP 07111240007004

Dosen Pembimbing
Dr. Eng I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc
Danar Fahmi, S.T, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**ANALYSIS OF CHARACTERISTIC PRE-BREAKDOWN
VOLTAGE PHENOMENON BASED EXPERIMENT ON CORN
OIL INSULATION**

Eber Wonda
NRP 07111240007004

Advisor
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T M.Sc.
Danar Fahmi, S.T, M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

**ANALISIS KARAKTERISTIK
FENOMENA *PRE-BREAKDOWN VOLTAGE*
BERBASIS PENGUJIAN PADA MEDIA ISOLASI
CAIR MINYAK JAGUNG**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dr.Eng. I Made Yulistya N., ST., M.Sc.
NIP. 19700712 199802 1001

Danar Fahmi, S.T., M.T.
NIP. 198909252014041002



PERNYATAAN KEASILIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**ANALISIS KARAKTERISTIK FENOMENA PRE-BREAKDOWN VOLTAGE BERBASIS PENGUJIAN PADA MEDIA ISOLASI CAIR MINYAK JAGUNG**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Satubaya, Juli 2018



Eliza Wanda
NRP 07111340067831

ANALISIS KARAKTERISTIK FENOMENA *PRE-BREAKDOWN VOLTAGE* BERBASIS PENGUJIAN PADA MEDIA ISOLASI CAIR MINYAK JAGUNG

Nama : Eber Wonda
Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ABSTRAK

Fenomena *pre-breakdown voltage* adalah suatu fenomena kegagalan dielektrik pada media isolasi cair. Fenomena tersebut dapat mempengaruhi kinerja suatu media isolasi cair. Semakin cepat suatu bahan isolasi cair mengalami fenomena *pre-breakdown voltage*, sehingga kekuatan dielektrik bahan isolasi tersebut mengalami penurunan. Dalam pengujian ini akan dilakukan pengamatan fenomena *pre-breakdown voltage* pada bahan isolasi cair dengan menggunakan pembangkitan tegangan tinggi DC skala laboratorium. Pada proses pengujian, yang dilakukan pengukuran arus menggunakan NI 9246 yang disambungkan dengan computer yang terdapat perangkat lunak LabVIEW dan diolah menggunakan perangkat lunak DIAdem. Dalam waktu yang bersamaan, fenomena *pre-breakdown voltage* akan direkam menggunakan kamera beresolusi tinggi agar mendapatkan gambar yang baik. Data arus yang direkam oleh akuisisi data disinkronkan dengan gambar yang terambil oleh kamera pada isolasi minyak selama pengujian. Dari eksperimen tersebut dapat diketahui karakteristik arus pada saat fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak jagung.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa fenomena *pre-breakdown voltage* terjadi pada isolasi minyak Jagung dengan tegangan pembangkitan antara 38 kV hingga 40 kV dan nilai arus yang terukur pada akuisisi data ketika terjadi fenomena tersebut adalah 130 mA - 280 mA.

Kata Kunci: Isolasi Cair Minyak Jagung, Karakteristik Fenomena *pre-breakdown voltage*.

***ANALYSIS OF CHARACTERISTIC PRE- BREAKDOWN
VOLTAGE PHENOMENON BASED EXPERIMENT ON
CORN OIL INSULATION***

Name : Eber Wonda
Advisor I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
Advisor II : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ABSTRACT

Phenomenon pre-breakdown voltage is a phenomenon of failures dielectrics to the media isolation. The phenomenon can update a performance of a work of the media isolation of liquidity. The faster of the materials isolation liquidity sustain of phenomenon pre-breakdown voltage, with the result that the power of liquidity sustaining decreased. In this experimentation will do an observation of phenomenon pre-breakdown voltage at isolation of liquidity using the DC high voltage generation in the scales of the laboratory. On proses of the experiment, will perform of measuring by using NI9246 to link with the computer has LabVIEW accessed and the process uses a Diadem software. In the same time, phenomenon pre-breakdown voltage will record with the high-resolution camera for good quality of the pictures. The data must record with an acquisition data synced with images that already taken during the experiment isolation of oils. From the experiment can be known the characteristic of the phenomenon pre-breakdown voltage at the isolation of corn's oils.

The result of experimentation showing the phenomenon of pre-breakdown voltage happens at the isolation of corn's oils with generator voltage about 38kv to 40 the number measured at an acquisition data happen while the phenomenon is about 130 mA - 280mA

Key words: isolation liquidity of corn's oils, characteristic Pre-Breakdown Voltage of the phenomenon

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Kuasa, yang selalu memberikan rahmat-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Karakteristik Fenomena Pre-Breakdown Voltage Berbasis Pengujian pada Media Isolasi Cair Minyak Jagung**” ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak Daniar Fahmi, selaku dosen pembimbing yang telah membimbing penulis selama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Orang tua dan kakak Yakius Wonda beserta keluarga, yang selalu memberikan nasehat, semangat, doa dan finansial kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Pemerintah Provinsi Papua yang telah membiayai saya selama menekuni ilmu di ITS tahun 2012-2017.
4. Mas Arief, mbak Amanda, dan beberapa asisten Laboratorium Tegangan Tinggi, Hadi, Reno dan yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu, yang selalu mendukung selama penulis Tugas Akhir.
5. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTE, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
6. Teman-teman Angkatan 2012 yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir, terutama Dwi Krisna dan Adit (bandung).
7. Teman-teman Tugas Akhir Laboratorium Tegangan Tinggi yang senantiasa mengingatkan dan mendukung penulis agar penulis bisa wisuda ke-118.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juli 2018

Eber Wonda

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
 BAB 1 PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Metode Penelitian.....	2
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 DASAR TEORI.....	5
2.1 Bahan Isolasi Cair.....	5
2.1.1 Isolasi Cair Minyak Nabati.....	5
2.2 Karakteristik Isolasi Cair.....	8
2.2.1 Sifat Listrik Isolasi Cair.....	9
2.2.2 Karakteristik Perpindahan Panas.....	9
2.3 Jenis-Jenis Isolasi Cair.....	9
2.4 Kelebihan dan Kekurangan Isolasi Cair.....	10
2.5 Kekuatan Dielektrik.....	11
2.6 Mekanisme Kegagalan pada Dielektrik Cair.....	12
2.6.1 Kegagalan Zat Murni atau elektronik.....	12
2.6.2 Kegagalan Bola Cair dalam Media Isolasi Cair...	14
2.6.3 Kegagalan Gelembung Udara atau Kavitasi.....	17
2.6.4 Butiran Padat dalam Media Isolasi Cair.....	19
2.6.5 Kegagalan Campuran Zat Cair-Padat.....	22
2.7 Fenomena <i>Pre-Breakdown Voltage</i>	23
BAB 3 PERALATAN UJI DAN PENGAMBILAN DATA.....	25
3.1 Peratan Uji.....	25
3.1.1 Pembangkitan Tegangan Tinggi DC.....	26
3.1.2 Jenis Elektroda.....	28
3.1.3 Jenis Minyak Isolasi.....	28

3.1.4 Akuisis Data.....	29
3.2 Pengambilan Data	30
3.2.1 Akuisis Data.....	31
3.2.2 Pengambilan Gambar.....	32
BAB 4 ANALISA DATA.....	35
4.1 Mekanisme Terjadi Fenomena Pre-Breakdown Voltage pada Bahan Isolasi Minyak	35
4.1.1 Teganga Dibangkitkan secara Kontinyu.....	35
4.2 Karakteristik Arus Fenomena <i>Pre-breakdown Voltage</i> pada Bahan Isolasi Minyak.....	40
4.3 Perbandingan Karakteristik Fenomena Pre-breakdown Voltage pada isolasi Cair.....	44
BAB 5 PENUTUP.....	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA	47
RIWAYAT HIDUP PENULIS	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema alat uji flash dan fire point	6
Gambar 2.2	Pembangkitan Sel Uji Tegangan Tembus.....	7
Gambar 2.3	Orde tingkat kegagalan bahan isolasi cair.....	10
Gambar 2.4	Kekuatan medan listrik pada dielektrik ciar.....	11
Gambar 2.5	Kegagalan elektronik pada zat cair.....	13
Gambar 2.6	Bantuk medan listrik sferoida.....	14
Gambar 2.7	Grafik kuat medan listrik terhadap nilai γ	15
Gambar 2.8	Bola cair memanjang penyebab kegagalan.....	17
Gambar 2.9	Pengaruh medan listrik terhadap gelembung udara.....	18
Gambar 2.10	Grafik perbandingan hasil perhitungan kekuatan gagal medan gelembung udara dan hasil percobaan.....	19
Gambar 2.11	Kegagalan butiran padat pada isolasi cair.....	20
Gambar 2.12	Tegangan pra-kegagalan dan tegangan gagal tergantung pada tingkat kehomogenan medan.....	23
Gambar 3.1	Skema alat pengujian.....	25
Gambar 3.2	Peralatan uji yang digunakan.....	26
Gambar 3.3	Rangkaian Pengganti pembangkitan tegangan tinggi DC.....	27
Gambar 3.4	Elektroda uji jarum-plat.....	28
Gambar 3.5	Minyak uji dalam tabung akrilik	29
Gambar 3.6	NI 9246 akuisisi data arus	30
Gamabr 3.7	Tampilan front panel dan block diagram pada LabVIEW.....	32
Gambar 4.1	Sebelum ada perubahan kondisi pada minyak isolasi.....	36
Gambar 4.2	Perubagan pada minyak dengan tegangan 36 kV (i). Kondisi minyak isolasi mengalami perubahan di antara kedua elektroda (ii). mulai terbentuk <i>streamer</i> pada minyak uji (iii). perkembangan <i>Streamer</i> pada minyak.....	36
Gambar 4.3	Perubahan kondisi minyak pada tegangan 28 kV (i). perkembangan <i>streamer</i> (ii). terlihat dengan jelas perkembangan <i>streamer</i> (iii). gelembung gas mulai terbentuk (iv). makin banyak gelembung gas yang terbentuk.....	38

Gambar 4.4	Perubahan kondisi minyak isolasi pada tegangan 40 kV (i). gelembung gas terurai (ii) gelembung gas terurai dan akan terjadi <i>breakdown voltage</i>	39
Gambar 4.5	Tegangan tembus (<i>breakdown voltage</i>).....	40
Gambar 4.6	Grafik arus hasil pengujian dengan nilai arus yang terukur	42
Gambar 4.7	Proses terjadinya fenomena <i>pre-breakdown voltage</i> pada minyak isolasi yang disesuaikan dengan arus yang terukur.....	43

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi peralatan pembangkitan tagangan tinggi DC.....	27
Tabel 3.2	Spesifikasi kandungan dalam minyak Jagung (CCO Corn Oil).....	29
Tabel 3.3	Spesifikasi Current Transformer CT	30
Tabel 4.1	Sebagian data hasil pengujian.....	41
Tabel 4.2	Arus yang terukur ketika kondisi minyak mengalami perubahan.....	42

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Media isolasi minyak merupakan suatu media yang digunakan untuk memisahkan lebih dari satu elektroda bertegangan. Media isolasi minyak secara umum dibagi menjadi tiga (3) macam yaitu isolasi padat, cair dan gas [1]. Isolasi cair memiliki peran penting khususnya pada peralatan listrik transformator daya, circuit breaker, dan kapasitor kerana berpengaruh pada kinerja dari peralatan tersebut. Isolasi cair yang digunakan pada peralatan sistem tenaga biasanya di gunakan sebagai bahan isolasi maupun bahan pendingin [2-4]. Beberapa alasan media isolasi cair banyak digunakan sebagai media isolasi pada peralatan listrik, pertama adalah karena isolasi cair memiliki kekuatan dielektrik yang lebih baik di bandingkan dengan media isolasi gas menurut hukum Pashen, kedua isolasi cair akan mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi dan secara serentak melalui proses konfeksi menghilangkan panas yang timbul akibat rugi energi, dan yang ketiga adalah isolasi cair cenderung memperbaiki diri sendiri (*self heading*) apabila terjadi pelepasan muatan (*discharge*). Namun pada isolasi cair terdapat kekurangan utama yaitu mudah terkontaminasi. Kontaminasi ini dapat menyebabkan terjadinya kegagalan pada isolasi cair. Fenomena kegagalan isolasi cair sering terjadi pada isolasi antara lain streamer, corona, dan tegangan tembus (*breakdown voltage*). Kegagalan ini menunjukkan bahwa merunuyan kekuatan dielektrik dari media isolasi cair yang digunakan, sehingga dapat mempengaruhi kinerja dari peralatan listrik yang digunakan media isolasi ini.

Tegangan tembus (*Breakdown Voltage*) pada isolasi cair dapat dipengaruhi oleh berbagai hal antara lain; jenis isolasi yang digunakan, waktu pemakaian, gelembung dan besar tegangan yang dikenakan partikel [2]. Selain itu bentuk dan material dari elektroda uji juga menjadi pengaruh gagalnya isolasi cair ini. Tegangan pada isolasi cair merupakan suatu tarikan atau tekanan (stress) yang harus dilawa oleh gaya yang terdapat dalam isolasi itu sendiri agar isolasi tersebut tidak mengalami kegagalan dalam menjalankan fungsinya sebagai bahan isolasi. Dalam struktur molekul material isolasi, elektron-elektron terikat erat pada molekulnya, dan ikatan ini mengadakan perlawanan terhadap tekanan yang disebabkan oleh adanya tegangan. Jika ikatan pada molekul ini putus pada suatu tempat maka sifat isolasi pada tempat itu

hilang. Apabila pada bahan isolasi tersebut diberikan tegangan, maka akan terjadi perpindahan elektron-elektron dari satu molekul ke molekul lainnya sehingga timbul arus konduksi atau arus bocor. *Pre-breakdown voltage* merupakan proses dimana isolasi cair akan mengalami kegagalan yang menunjukkan adanya perubahan pada isolasi cair, misalnya adanya gelembung pada isolasi cair yang digunakan [1-7].

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam studi ini adalah bagaimana menentukan karakteristik dari *pre-breakdown voltage* yang berupa nilai arus sebelum terjadi *breakdown voltage*. Parameter selanjutnya yang dicari adalah fenomena-fenomena yang terjadi saat eksperimen berlangsung yang meliputi perubahan arus yang terjadi selama pengujian berlangsung dan pergerakan minyak jagung sesaat sebelum terjadi *breakdown*. Permasalahan dalam studi ini dibatasi pada analisis yang dilakukan terhadap hasil eksperimen fenomena *pre-breakdown voltage* dengan pembangkitan tegangan DC pada isolasi minyak jagung menggunakan elektroda pengujian jarum-plat dengan jarak 2 cm.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada studi ini adalah untuk mengetahui karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak jagung ditinjau dari proses terbentuknya fenomena dan arus yang terukur ketika sedang terjadi fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak jagung. Selanjutnya karakteristik yang didapatkan dapat digunakan untuk mengetahui proses kegagalan suatu bahan isolasi tersebut.

1.4 Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada studi ini adalah pengamatan karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* berbasis pengujian untuk mendapatkan karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak jagung. Pengujian pada isolasi minyak jagung dilakukan pada kondisi minyak baru. Metode yang diusulkan diharapkan dapat membantu dalam memahami karakteristik fenomena *pre-breakdown* pada isolasi minyak jagung.

Adapun urutan kerja yang akan dilakukan pada studi ini pertama adalah studi literatur. Kedua, setelah studi literatur terlaksana, selanjutnya adalah persiapan alat uji meliputi minyak jagung, elektroda

yang digunakan serta peralatan yang digunakan untuk pengujian dan pengambilan data serta pengolahan data. Ketiga, setelah mempersiapkan alat uji selanjutnya melakukan pengujian yang bertujuan untuk pengambilan data. Peralatan yang diperlukan untuk pengujian adalah rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC, minyak jagung, elektroda jarum-plat. Kemudian untuk mendapatkan akuisisi data pengamatan fenomena *pre-breakdown voltage* digunakan kamera Canon 60D dan NI 9246 untuk merekam arus *pre-breakdown voltage* yang dihubungkan ke NI LabVIEW. Keempat, pengujian yang telah dilakukan akan menghasilkan data sehingga perlu adanya pengolahan data yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak jagung. Data yang diperoleh nantinya akan diolah menggunakan LabVIEW dan Ms. Excel. Data yang diolah berupa data arus yang nantinya akan dicocokkan dengan gambar yang terekam pada kamera. Langkah terakhir yakni memberikan kesimpulan dan melakukan evaluasi terhadap hasil yang diperoleh.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika dalam penulisan buku Tugas Akhir ini terdiri dari lima bagian. Setiap bagian memiliki ruang lingkup pembahasan masing-masing.

Bab I merupakan bab pendahuluan yang membahas tentang penjelasan latar belakang, permasalahan, tujuan, metode dan sistematika dalam penulisan.

Bab II membahas tentang teori penunjang dalam pengerjaan tugas akhir ini. Pada bab ini membahas tentang isolasi minyak, teori kegagalan isolasi cair, jenis-jenis isolasi cair, kelebihan dan kekurangan isolasi cair, kekuatan dielektrik dan fenomena *pre-breakdown voltage*.

Bab III membahas tentang rancangan alat pengujian yang digunakan dalam pengujian fenomena *pre-breakdown voltage* dan metode yang digunakan dalam pengambilan data gambar maupun data arus.

Bab IV merupakan proses analisa data dari seluruh data pengujian sebelum data yang diperoleh dianalisa, terlebih dahulu data diolah agar mudah dalam melakukan sinkronisasi data. Sehingga dalam analisa data, didapatkan hasil sinkronisasi data gambar dan arus untuk fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak jagung.

Terakhir pada bab V adalah bab penutup. Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil seluruh pembahasan yang didapatkan.

Halamai ini sengaja dikosongkan

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Bahan Isolasi cair

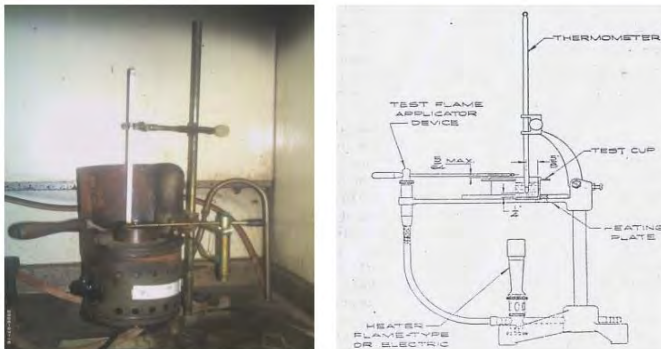
2.1.1 Isolasi Cair Minyak Nabati [2]

Isolasi Cair Minyak Nabati merupakan Minyak isolasi nabati merupakan kelompok minyak yang berasal dari sari tumbuhan misalnya jenis minyak sayur. Jenis minyak ini mulai banyak dipakai sebagai bahan isolasi pada akhir abad ke-19, mengingat semakin menipisnya cadangan mineral tak terbarukan dan masih kecilnya pemakaian minyak sintesis sehingga minyak nabati dapat perhatian lebih. Contoh minyak isolasi nabati yang telah diteliti adalah minyak jagung, minyak jarak, minyak kelapa murni, minyak kelapa sawit, minyak bunga matahari dan minyak kedelai.

Karakteristik pengujian minyak nabati sebagai alternatif isolasi pengganti minyak transformator distribusi 20kv. Secara umum yang diharapkan dari suatu minyak pelumas adalah perubahan yang sekecil mungkin yang terjadi pada viskositasnya di dalam menghadapi pengaruh jangkauan suhu yang besar (Anton L. Wartawan, 1983). Kekuatan dielektrik merupakan ukuran kemampuan suatu material untuk bisa tahan terhadap tegangan tinggi tanpa berakibat terjadinya kegagalan. Kekuatan dielektrik ini tergantung pada sifat atom dan molekul cairan itu sendiri. Namun demikian dalam prakteknya kekuatan dielektrik tergantung pada material dari elektroda, suhu, jenis tegangan yang diberikan, gas yang terdapat dalam cairan dan sebagainya yang dapat mengubah sifat molekul cairan.

i. Metode penelitian

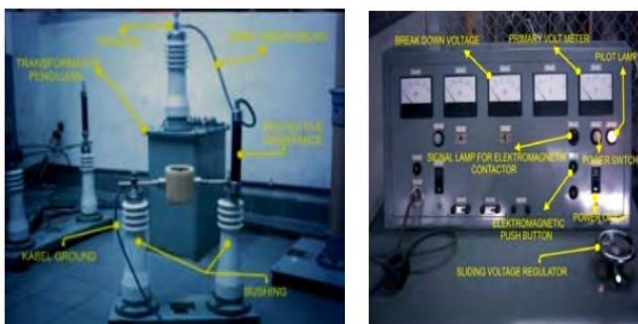
Jenis minyak yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis minyak nabati utamanya Minyak Bunga Matahari, Minyak Kelapa Sawit, dan Minyak Jagung. Pelaksanaan Pengujian, Kekuatan dielektrik (*dielectric strength*) dari suatu minyak isolator merupakan nilai tegangan dimana terjadi breakdown diantara dua elektroda, dengan jarak tertentu (2,5mm) dan diletakan dalam sel tes (test cell).



Gambar 2.1 Skema Alat Uji Flash dan Fire Point [2]

Prosedur pelaksanaan pengujian kekuatan dielektrik minyak adalah sebagai berikut:

Pertama, Sel tes dibersihkan dahulu dengan menggunakan minyak uji untuk menghilangkan kotoran yang terdapat pada sel. Minyak uji kemudian dituang secara perlahan ke dalam sel tes, sampai volume minyak kira-kira mencapai 20 mm di atas ujung elektroda. Usahakan agar tidak terjadi gelembung saat penuangan minyak. Kedua, setelah bahan uji (minyak) terbebas dari gelembung udara yang ada, tegangan 50 kV mulai diterapkan mulai dari 0 dengan kecepatan sekitar 3 kV/s sampai dengan terjadinya tegangan tembus (breakdown). Apabila telah terjadi breakdown atau lompatan bunga api diantara elektroda, kemudian rangkaian dibuka secara normal. Tes dilakukan sebanyak 6 kali untuk jenis minyak dan suhu yang sama. Ketiga, setiap selesai pengujian atau setelah terjadi breakdown, elektroda dalam minyak dibersihkan dengan menggunakan kain yang bersih dan kering untuk menghilangkan karbon yang dihasilkan oleh busur api dan dibiarkan selama 10–15 menit supaya gelembung udara dalam minyak lepas sebelum tes breakdown yang berikutnya. Keempat, tegangan breakdown adalah tegangan yang dicapai saat terjadi lompatan api (*flash-over*) diantara dua elektroda. Dari 5 kali pengujian yang dilakukan, dari tegangan tembus kemudian dibagi dengan lebar sela elektroda untuk mengetahui kekuatan dielektriknya.



Gambar 2.2 Sel Uji Tegangan Tembus

Peralatan uji yang digunakan dalam pengujian tegangan tembus ini adalah satu set pembangkitan tegangan tinggi AC, tabung penguji untuk menguji bahan terhadap kemampuan menahan tegangan baik AC maupun Impuls, elektroda diameter 12,5mm, bahan terbuat dari fiber glass, barometer dan hygrometer (untuk mengukur tegangan dan kelembaban udara), Thermometer suhu dan Bahan yang akan diuji (Minyak bunga mata hari, Minyak kelapa sawit, Minyak jagung).

ii. Pembahasan dan Hasil

Dari data hasil pengujian dapat diketahui berapa besar kekuatan dielektrik dari masing-masing minyak pelumas tersebut. Untuk mengetahui kekuatan dielektrik dari nilai tegangan tembus di bagi ketebalan isolasi cair.

Kekuatan dielektrik pada minyak bunga matahari dengan suhu dan tegangan yang bervariasi 30°C, 50°C, 70°C dan 80°C dengan tegangan masing-masing 16,6 kV tegangan tembus 6,64kV/mm, 23 kV tegangan tembus 9,2kV/mm, 33,2kV tegangan tembus 13,28kV/mm, dan 38,2kV tegangan tembus 15,28kV/mm. Kekuatan dielektrik pada minyak kelapa sawit dengan tegangan 21,6kV tegangan tembus 12,8kV/mm pada suhu 30°C, 27kV tegangan tembus 8,65kV/mm pada suhu 50°C, 28,2kV tegangan tembus 11,28kV/mm pada suhu 70°C, 30,2kV tegangan tembus 14,12kV/mm pada suhu 80°C. Kekuatan dielektrik pada minyak Jagung dengan tegangan 16,6kV tegangan tembus 6,64kV/mm pada suhu 30°C, 20kV tegangan tembus 8,04kV/mm pada suhu 50°C, 34,6kV tegangan

tembus 13,84kV/mm pada suhu 70⁰C, 40,8kV tegangan tembus 17,1kV/mm pada suhu 80⁰C.

Nilai dari tegangan tembus suatu bahan isolasi, menentukan nilai dari kekuatan dielektrik suatu bahan isolasi. Semakin besarnya tegangan yang mampu ditahan oleh suatu bahan semakin besar kekuatan dielektrik bahan tersebut. Oleh karena itu penelitian pada sifat dielektrik dari bahan isolasi cair sangat dititik beratkan dalam penentuan nilai tegangan tembus (*breakdown voltage*) bahan uji yang digunakan dalam hal ini yaitu antara lain minyak (Minyak Bunga matahari, Minyak Sawit, Minyak Jagung. Berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh ASTM yakni dalam standar D-877 disebutkan bahwa suatu bahan isolasi harus memiliki tegangan tembus sebesar kurang dari 30 kV untuk besar sela elektroda 1 mm, dengan kata lain kekuatan dielektrik bahan isolasi kurang lebih 30 kV/mm. Sedangkan menurut standar ASTM D-1816 suatu bahan isolasi harus mampu menahan tegangan sebesar 28 kV untuk satu lebar sela elektroda sebesar 1,02 mm. Standar ini merupakan standar yang diterima secara internasional dan harus dipenuhi oleh bahan yang dikategorikan sebagai suatu bahan isolasi.

Hasil pengujian pada suhu kamar (50⁰C) tegangan tembus rata-rata tertinggi adalah minyak bunga matahari yaitu 9,2kV/mm dan yang terendah pada suhu sama Minyak jagung mencapai 8,04kV/mm. Dari ketiga jenis minyak nabati (Bunga matahari, Jagung dan Sawit) dapat disimpulkan bahwa yang mempunyai tegangan tembus yang paling tinggi adalah minyak jagung mencapai 40,8kV pada suhu 80⁰C sedangkan minyak Sawit 30,2kV.

2.2 Karakteristik Isolasi Cair

Isolasi cair banyak digunakan pada peralatan sistem tenaga listrik, misalnya transformator, pemutus tenaga, switch gear dan lain-lain. Sebab isolasi cair memiliki beberapa fungsi penting antara lain sebagai pemisah antara konduktor yang bertegangan (V), pendingin, bahan pengisis pada dielektrik berlapis misal pada dielektrikum kertas/minyak. Sebab pada dasarnya isolasi cair memiliki kuat dielektrik yang baik dan kemampuan hantar panas yang tinggi melalui proses konfeksi [7].

2.2.1 Sifat Listrik Isolasi Cair [6]

Adapun beberapa sifat listrik yang sangat penting untuk menentukan kekuatan dielektrik dari bahan isolasi cair adalah :

- a. Withstand Breakdown, merupakan kemampuan agar tidak mengalami tegangan tembus dalam kondisi tekanan listrik yang tinggi.
- b. Faktor Daya dapat menentukan kualitas kerja dari bahan isolasi cair, sebab dalam kondisi berbeban mengalami rugi-rugi dielektrik. Minyak transformator murni mempunyai faktor disipasi yang bervariasi antara 10^{-4} pada suhu 20° dan 10^{-3} pada suhu 90° dengan frekuensi 50 Hz.
- c. Resistivitas adalah suatu cairan yang juga tergolong sebagai isolasi cair apabila resistivitasnya lebih dari $10^9 \Omega\cdot\text{m}$. Pada sistem tegangan tinggi nilai resistivitas yang diperlukan untuk material isolasi adalah $10^{16} \Omega\cdot\text{m}$ atau lebih.
- d. Kapasitansi listrik per unit menentukan pemetivitas relatifnya. Kemampuan isolasi cair dalam menyimpan muatan listrik.

2.2.2 Karakteristik Perpindahan Panas

Perpindahan panas biasanya di pengaruhi oleh konveksi. Faktor utama yang dapat mempengaruhi perpindahan panas adalah konduktivitas termal dan viskositas. Semakin tinggi nilai konduktivitas termal, maka dapat digunakan pada peralatan sebagaimana dioperasikan secara berkelanjutan pada temperatur yang tinggi. Nilai konduktivitas termal yang rendah dan nilai viskositas yang tinggi dapat menjadi penyebab terjadinya pemanasan berlebihan pada area peralatan yang tesian oleh isolasi cair seperti transformator, kabel, pemutus (*circuit breaker*) dan lain-lain.

2.3 Jenis-jenis Isolasi cair

Minyak isolasi terdiri dari beberapa jenis yang dapat dibedakan berdasarkan cara pembuatan dan bahan pembuatan adalah senagai berikut:

- a. *Minyak Isolasi Mineral*

Bahan dasar dari minyak isolasi mineral adalah minyak bumi kemudian diproses dengan cara destilasi. Karakteristik dari minyak jenis ini memiliki tahanan isolasi yang sangat tinggi dan stabilitas panas yang baik. Minyak isolasi mineral umumnya banyak

digunakan pada peralatan tegangan tinggi misalnya circuit breaker, transformator daya, kapasitor daya dan kabel daya. Minyak isolasi juga berfungsi sebagai bahan dielektrik, bahan pendingin dan pemadam busur api.

b. *Minyak Isolasi Sintesis*

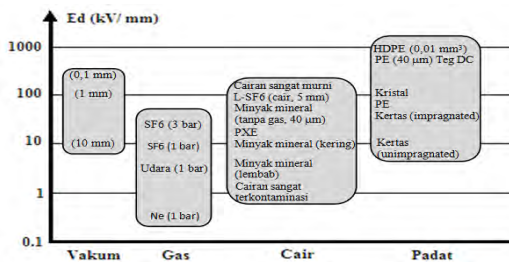
Minyak isolasi sintesis ini dapat diolah dengan proses kimia agar mendapatkan karakteristik yang baik. Kelebihan utamanya dari minyak isolasi ini yaitu bersifat tidak mudah terbakar. Tetapi minyak isolasi jenis ini memiliki kekurangannya adalah mudah terkontaminasi dengan udara. Contoh dari minyak isolasi sintesis yaitu ester sintetis, askarel, fluorinasi cair, dan silicon cair.

c. *Minyak Isolasi Nabati*

Minyak isolasi nabati merupakan kelompok minyak yang berasal dari sari tumbuhan misalnya jenis minyak sayur. Jenis minyak ini mulai banyak dipakai sebagai bahan isolasi pada akhir abad ke-19, mengingat semakin menipisnya cadangan mineral tak terbarukan dan masih kecilnya pemakaian minyak sintesis sehingga minyak nabati dapat perhatian lebih. Contoh minyak isolasi nabati yang telah diteliti adalah minyak jagung, minyak jarak, minyak kelapa murni, minyak kelapa sawit, dan minyak kedelai.

2.4 Kelebihan dan Kekurangan Isolasi Cair [7]

Minyak isolasi cair memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan dari minyak isolasi adalah sebagai bahan pengisi yang baik, kekuatan dielektriknya lebih tinggi dan memiliki kemampuan hantar panas tinggi melalui proses konveksi. Selain itu, isolasi cair juga berfungsi sebagai pendingin untuk mengurangi rugi-rugi panas pada transformator. Perbandingan tingkat kegagalan pada media isolasi padat, cair, gas dan vakum ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut.



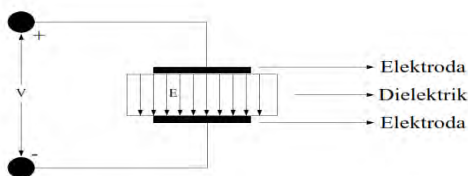
Gambar 2.3 Orde tingkat kegagalan media isolasi

Tingkat kegagalan media isolasi yang terdapat pada Gambar 2.1, terlihat dengan jelas bahwa bahan isolasi cair memiliki waktu yang lama menuju proses kegagalan.

Kekurangan dari bahan isolasi cair adalah kekuatan elektrik berkurang akibat penuaan dan kontaminasi, pemuaian panas, membutuhkan wadah kedap air, dan harganya lebih mahal.

2.5 Kekuatan Dielektrik

Suatu dielektrik tidak mempunyai elektron-elektron bebas, melainkan elektron-elektron terikat pada inti atom unsur yang membentuk dielektrik tersebut. Apabila kedua elektroda piring sejajar diberi tegangan searah V, dapat ditunjukkan pada Gambar 2.2, maka dapat menimbulkan medan listrik (E) di dalam dielektrik. Medan elektrik ini memberikan gaya terhadap elektron-elektron agar terlepas dari ikatannya dan menjadi elektron bebas. Dengan kata lain medan elektrik adalah sebuah beban terhadap dielektrik dapat berubah sifat menjadi konduktor.



Gambar 2.4 Kekuatan medan listrik pada dielektrik cair

Dalam penerapan tegangan kekuatan dielektrik dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan yang menyebabkan kerusakan atau tembus listrik (V) dengan tebal isolasi (d) yang memisahkan antara elektroda. Hal ini dapat dilihat pada persamaan 2.1 berikut:

$$E = \frac{V}{d} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana, E adalah kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh dielektrik (kV/cm), V adalah tegangan maksimum yang dapat dibaca oleh alat ukur (kV) dan D merupakan tebal isolasi.

Pada prakteknya kekuatan dielektrik tergantung pada material dari suhu, jenis tegangan yang diberikan, elektroda dan gas pada cairan yang dapat mengubah molekul cair. Pada isolasi cair kekuatan dielektrik setara atau sama dengan tegangan kegagalan yang terjadi.

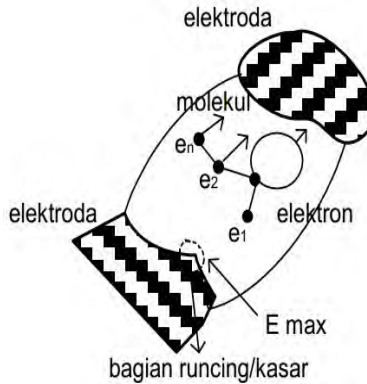
2.6 Mekanisme Kegagalan Dielektrik Cair [9-11]

Suatu kegagalan dielektrik yang dialami pada isolasi cair dapat dipengaruhi oleh berbagai hal diantaranya jenis isolasi cair, lama pemakaian dan besar tegangan yang dikenakan. Selain itu, bentuk dan material dari elektroda pengujian juga berpengaruh pada gagalnya isolasi cair. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kegagalan isolasi cair diantaranya partikel, air, dan gelembung. Terdapat empat jenis teori kegagalan pada bahan isolasi cair, yaitu kegagalan zat murni atau elektronik, gelembung udara atau kavitasi, kegagalan bola cair, dan kegagalan butiran padat pada isolasi cair.

Jika suatu tegangan diberikan pada dua elektroda yang di celupkan ke dalam minyak (isolasi cair), maka muncul konduksi arus yang kecil. Jika tegangan dinaikan secara kontinyu maka, pada titik kritis tertentu akan terjadi lecutan pada kedua elektroda. Lecutan pada zat cair ini terdiri dari beberapa unsur antara lain aliran listrik yang besarnya ditentukan oleh rangkaian, lintasan cahaya yang cerah dari elektroda yang satu ke elektroda lain, terjadi gelembung gas butiran zat padat hasil dekomposisi zat lain dan terjadi lubang pada elektroda.

2.6.1 Kegagalan Zat Murni atau Elektronik

Teori kegagalan zat murni atau elektronik merupakan perluasan teori kegagalan dari media isolasi gas, maka kegagalan pada media isolasi cair dianggap setara dengan media isolasi gas. Apabila pada permukaan elektroda tidak rata atau ada bagian tertentu yang runcing maka kuat medan yang sangat besar terdapat pada bagian yang runcing tersebut. Sehingga muncul kuat medan listrik yang tinggi di bagian permukaan elektroda yang runcing dapat menghasilkan elektron e_1 (lihat Gambar 2.3) yang akan memulai terbentuknya banjiran elektron (*electro avalanche*).



Gambar 2.5 Kegagalan elektronik pada zat cair.

Elektron yang dihasilkan e_1 , e_2 , e_3 dan e_n yang kemudian akan menyebabkan timbulnya arus konduksi dalam media isolasi cair pada kuat medan listrik yang tinggi. Arus konduksi yang timbul tersebut mempunyai kerapatan sebesar:

$$J = J_t e^{\frac{4.4\sqrt{E}}{T}} \left[\frac{A}{cm^2} \right] \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana,

$$J_t = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

dan,

$$E = ME_a \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana,

J = Kerapatan arus konduksi [Acm^{-2}]

J_t = Kerapatan arus termionik [Acm^{-2}]

E_a = Kuat medan yang diterapkan [Vcm^{-1}]

M = faktor ketidakrataan permukaan (= 10 untuk permukaan halus)

Kondisi untuk memungkinkan terjadinya banjir elektron, diperoleh dengan menyamakan perolehan energi pada elektron yang menempuh lintasan bebas rata-rata yaitu:

$$U_1 = F\lambda = e E\lambda \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan energi yang diperlukan untuk mengionisasi molekul

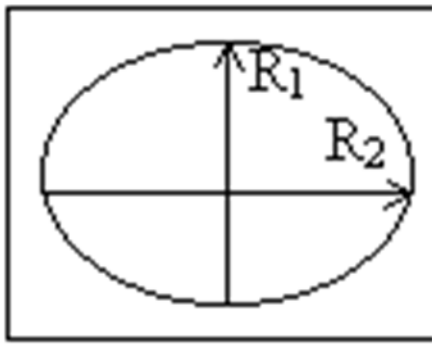
$$U_2 = ch \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana,

- E = Medan yang diterapkan [Vcm^{-1}]
- U = Energi [*Joule*]
- F = Gaya [*Newton*]
- λ = lintasan bebas rata-rata [*cm*]
- h = Kuantum energi untuk mengionisasikan molekul [*Joule*]
- c = konstanta

2.6.2 Kegagalan Bola Cair dalam Media Isolasi Cair

Suatu bahan isolasi cair dapat bercampur dengan sebuah bola dari jenis cairan lain. Sehingga dapat menyebabkan kegagalan akibat ketidaksabilan bola cair dalam medan listrik. Medan listrik didalamnya E_2 , yang ditunjukkan pada persamaan 2.7, pada Gambar 2.4 merupakan bola cair yang diberikan medan listrik E akan mengubah menjadi sferoida.



Gambar 2.6 Bentuk medan listrik sferoida [8]

Persamaan medan listrik didalam bola cair yaitu :

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 E}{\varepsilon_1 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)G} \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana,

$$G = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left\{ \frac{\gamma \cos^{-1} \gamma}{(\gamma^2 - 1)} - 1 \right\} \text{ dan } \gamma = \frac{R_2}{R_1}$$

R_1 = jari-jari pendek sferoida [*cm*]

R_2 = jari-jari panjang sferoida [cm]
 ε_1 = permitivitas bahan isolasi cair
 ε_2 = permitivitas bola cair

Dan persamaan kuat medan listrik dalam bahan isolasi cair, yaitu :

$$E = 600 \sqrt{\left(\frac{\pi\sigma}{\varepsilon_1 R}\right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - G\right)} H \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana,

$$H = 2\gamma^{\frac{1}{3}} \left(2\gamma - 1 - \frac{1}{\gamma^2}\right)$$

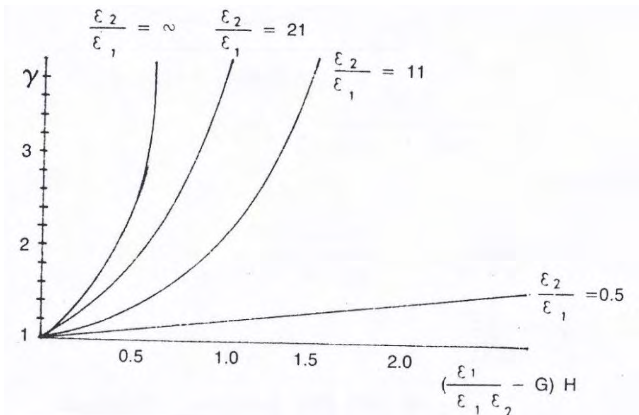
$$R = \frac{3}{4\pi} \text{ volume sferoida [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \text{ gaya tegangan permukaan [Nm}^{-1}\text{]}$$

Persamaan diatas dapat ditulis menjadi :

$$\frac{E}{600 \sqrt{\frac{\pi\sigma}{\varepsilon_1 R}}} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - G\right)} H \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

Pada persamaan 2.9 diatas merupakan persamaan yang memiliki hubungan fungsi γ yang dapat ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.7 Garfik kuat medan listrik terhadap nilai γ

Untuk nilai $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ terdapat pada Gambar 2.5 diatas, jika nilainya lebih dari 20, maka nilai medan listrik E dapat melewati maksimum apabila nilai γ naik, maka dikatakan bahwa tidak ada bentuk sferoida yang stabil diatas tekanan listrik yang kritis. Sedangkan dalam Gambar 2.5 diatas juga terlihat nilai $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ kurang dari 20 maka tidak ada medan kritis walaupun γ meningkat cepat bersama dengan kenaikan medan listrik. Pada bola gelembung udara dapat menghantarkan listrik $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \infty$ maka persamaan 2.9 dapat disederhakan menjadi :

$$E = 600 \sqrt{\left(\frac{\pi\sigma}{\varepsilon_1 R}\right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - G\right)} H \text{ [Vcm}^{-1}] \quad \text{.....(2.10)}$$

Maka persamaan medan kritis, dimana bola cair menjadi tidak stabil adalah sebagai berikut:

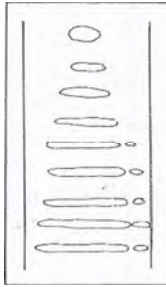
$$Ek = 487,7 \sqrt{\frac{\sigma}{\varepsilon_1 R}} \text{ [Vcm}^{-1}] \quad \text{.....(2.11)}$$

Pada bola cair sekecil bagaimanapun misalkan $R = 0,05 \mu\text{m}$ saja dapat mengakibatkan kegagalan pada medan listrik sebesar $Ek = 1 \text{ MVcm}^{-1}$. Medan listrik kritis jauh lebih rendah daripada kekuatan gagal bahan isolasi cair yang bersih, artinya adalah sumber kegagalan dari bahan isolasi cair.

Contoh untuk bola cair atau gelembung dalam bahan isolasi cair degan $\sigma = 41 \text{ dyne/cm}$, $\varepsilon_1 = 1,5$ dan $R = 0,5 \mu\text{m}$, maka medan listrik kritisnya adalah sebagai berikut :

$$Ek = 487,7 \sqrt{\frac{41}{1,5 \times 0,5}} = 0,361 \text{ MVcm}^{-1}$$

Kegagalan dielektrik pada bahan isolasi cair yang disebabkan oleh bola cair pada bahan silikon cair. Pada Gambar 2.6 merupakan sebagai contoh kegagalan dielektrik mewakili bahan isolasi cair. Setelah terjadi bola cair dan keadaan tidak stabil, maka bola cair dapat memanjang hingga bola cair sudah mencapai dua pertiga dari jarak elektroda, maka pada saluran tersebut akan timbul lucutan yang apat mengakibatkan kegagalan pada bahan isolasi cair.



Gambar 2.8 Bola cair yang memanjan penyebab kegagalan

2.6.3 Kegagalan Gelembung Udara atau Kavitasi

Kegagalan gelembung udara atau kavitasi merupakan bentuk kegagalan isolasi cair yang di sebabkan oleh tidak kemurnian minyak isolasi cair yang bercampur dengan gelembung udara. Gelembung udara adalah penyebab dari awal terjadi kegagalan total pada media isolasi cair. Krasucki dan Kao berpendapat bahwa timbulnya gelembung udara yang disebabkan oleh:

- Permukaan elektroda yang tidak rata dapat menimbulkan kantong-kantong udara pada permukaannya.
- Adanya tabrakan elektron dapat menimbulkan produk berupa gelembung udara atau gas pada media isolasi cair.
- Penguapan cairan karena adanya lecutan atau tembus tegangan pada bagian elektroda yang tidak teratur.
- Bahan isolasi cair mengalami perubahan temperatur (suhu) dan tekanan.

Medan listrik pada gelembung udara atau gas yang ada dalam bahan isolasi cair dapat dinyatakan pada persamaan berikut :

$$E_b = \frac{3\varepsilon_1 E_0}{2\varepsilon_1 + 1} \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana,

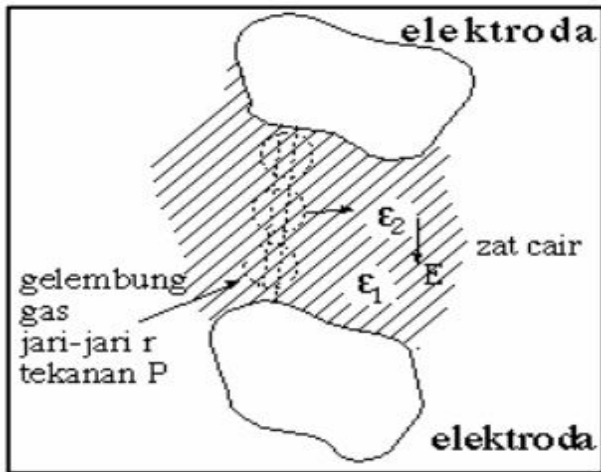
E_b = Medan listrik dalam gelembung udara atau gas [Vcm^{-1}]

ε_1 = Permittivitas medi isolasi cair

E_0 = Medan listrik dalam isolasi cair tanpa gelembung udara [Vcm^{-1}]

Apabila nilai E_b sama dengan medan batas untuk ionisasi gas, sehingga akan terjadi lecutan dalam gelembung. Hal ini dapat mempercepat pembentukan gas karena dekomposisi bahan isolasi cair dan dapat menyebabkan terjadinya kegagalan. Pada Gambar 2.7 merupakan pengaruh medan terhadap gelembung udara.

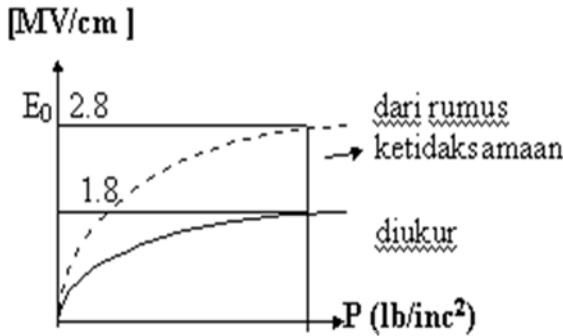
Karena pengaruh medan listrik yang kuat diantara elektroda maka gelembung-gelembung udara atau gas dalam media isolasi cair diantara kedua elektroda akan berubah memanjang mengikuti arah medan listrik. Hal ini dapat disebabkan oleh gelembung udara atau gas berusaha membuat energi potensial minimum. Gelembung-gelembung udara atau gas yang memanjang tersebut akan saling menyambung dan membentuk jembatan serat yang pada akhirnya akan mengakibatkan terjadinya kegagalan bahan isolasi cair (*breakdown*) ditunjukkan pada



Gambar 2.7.

Gambar 2.9 Pengaruh medan listrik terhadap gelembung udara

Perbandingan antara perhitungan teoritis dengan percobaan menurut teori kekuatan gagal medan gelembung yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dan grafik menunjukkan teori tersebut kurang relevan pada aktual sebab misalkan 1 untuk cairan n-heksana, maka terdapat perbedaan yang cukup besar antara perhitungan teori dengan percobaan. Sehingga mengakibatkan tidak memperhitungkan gelembung udara mula-mula sebelum terjadinya gelembung besar.



Gambar 2.10 Grafik perbandingan, hasil perhitungan, kekuatan gagal medan gelembung udara dan hasil percobaan

Untuk mendapatkan kriteria kegagalan, nilai volume selama berubah menjadi memanjang dianggap tidak berubah atau konstan. Berikut persamaan kekuatan gagal medan gelembung udara :

$$E_0 = \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \sqrt{\frac{2\pi\sigma(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{r}} \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{v_b}{2rE_0}} - 1 \right] \dots\dots\dots(2.13)$$

dimana,

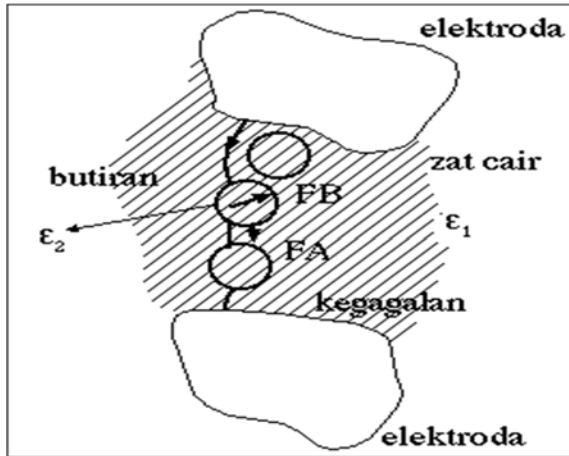
- σ = gaya tegangan permukaan isolasi cair [Nm^{-1}]
- ε_1 = permitivitas isolasi cair
- ε_2 = jari-jari awal gelembung (dianggap seperti bola) [cm]
- V_b = jatuh tegangan dalam gelembung [V]

Persamaan diatas dapat dijelaskan implisit dan sangat berpengaruh pada jari-jari awal gelembung r. Oleh sebab itu r merupakan fungsi dari tekana temperatur dari luar bahan isolasi cair. Apabila r besar akan menyebabkan kekuatan gagal E_0 akan sangat kecil.

2.6.4 Butiran Padat dalam Media Isolasi Cair

Butiran padat yang terdapat pada bahan isolasi cair merupakan jenis kegagalan yang dapat disebabkan oleh partikel atau butiran zat padat dalam bahan isolasi cair yang akan menyebabkan kegagalan. Butiran zat padat memiliki dua sifat yaitu permitivitas berlainan dengan permitivitas bahan isolasi cair. Pada Gambar 2.9 adalah apabila butiran

padat mempunyai permitivitas ϵ_2 dan permitivitas bahan isolasi cair ϵ_1 adalah sebagai berikut :



Gambar 2.11 Kegagalan butiran padat pada isolasi cair

Gaya yang bekerja pada butiran zat padat pada medan yang tak seragam besarnya dapat dinyatakan pada persamaan berikut :

$$F = r^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} E \text{ grad } E \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

dimana,

- F = gaya [Newton]
- r = jari-jari butiran [cm]
- grad E = gradien tegangan [Vcm^{-1}]

Persamaan diatas, secara khusus dapat disederhanakan menjadi :

$$F = \left(\frac{1}{2r^3} \right) \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \right) E^2 \text{ grad} \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

Pada Persamaan 2.14, terdapat dua kemungkinan yang akan terjadi yaitu :

1. Jika $\epsilon_2 > \epsilon_1$, F searah dengan E
2. Jika $\epsilon_2 < \epsilon_1$, F berlawanan arah dengan E

Apabila ε_2 semakin besar gaya (F) semakin besar pula. Dalam butiran yang bernilai $\varepsilon_2 = \infty$, maka menyebabkan gaya yang bekerja pada medan tak seragam diatas menjadi :

$$F = \left(\frac{1}{2r^3}\right) E^2 \text{ grad} \dots\dots\dots(2.16)$$

Khusus pada medan seragam, misal elektroda maupun elektrodan piringan sejajar dengan celah kecilmedan yang kuat terdapat pada tempat yang seragam. Dalam hal ini keadaan seimbang dan nilai $E^2 \text{ grad} = 0$. Oleh sebab itu, butiran padat aka ditarik oleh gaya F ke tempat medan yang saragam. Butiran-butiran pada akan menempati pada celah antara kedua elektroda yang seragam karena semakin banyak butiran tersebut akan membuat jembatan serat, kemudian jembatan serat ini akhirnya akan menyebabkan terjadinya kegagalan pada bahan isolasi cair. Adanya butiran penghantar diantara elektroda dapat menyebabkan pembesaran medan dalam bahan isolasi cair.

Pembesaran medan ditentukan oleh bentuk-bentuk butiran seperti :

1. Butiran padat bulat ($\gamma = 1$) ; $E_1 = 3 E$
2. Butiran padat sferoida ($\gamma = 2$) ; $E_1 = 8,5 E$
3. Butiran padat sferoida ($\gamma = 2$) ; $E_1 = 18 E$

Dimana,

γ = perbandingan jari-jari pendek sferoida

E = medan dalam cairan tanpa butiran [Vcm^{-1}]

E_1 = medan dalam cairan pada ujung butiran [Vcm^{-1}]

Jika E_1 lebih dari tegangan gagal bahan isolasi cair maka akan terjadi kegagalan setempat, kemudian menimbulkan gelembung-gelembung yang akhirnya menyebabkan kegagalan pada bahan isolasi cair. Gerakan yang disebabkan butiran oleh gaya F dapat menghambat oleh kekentalan pada bahan isolasi cair. Dalam hal ini untuk menghitung dengan rumus waktu yang dibutuhkan terjadinya kegagalan adala sebagai berikut :

$$t_b = \frac{\eta^2 c}{g^4 r^7 (E_b^2 - E_0^2) N} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana,

t_b = waktu kegagalan [s]

η = kekentalan (viskositas) [mm^2s^{-1}]
 c = konstanta
 g = faktor kekasaran; 3 untuk kekasaran setengah bola
 r = jari-jari butiran
 E_b = kekuatan gagal untuk waktu penerapan tekanan listrik singkat [Vcm^{-1}]
 E_0 = kekuatan gagal dalam waktu lama [Vcm^{-1}]
 N = konsentrasi butiran

Untuk waktu penerapan tegangan yang lama akan merubah persamaan, sehingga persamaan lamanya waktu kegagalan diatas menjadi :

$$(g^1 - 1)r^3 E_0^2 = 2kT \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

dimana kT merupakan energi termal (*Joule*). Jika $r = 3$, bila kekasaran bentuk setengah bola maka persamaannya berubah menjadi :

$$r^3 E_0^2 = \frac{1}{4} kT \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

2.6.5 Kegagalan Campuran Zat Cair-Padat

Kegagalan campuran Zat cair-padat, misal kertas dimasukan kedalam minyak biasa disebabkan oleh pemburukan. Kegagalan yang disebabkan oleh isolasi cair-padat terdapat dua pemburukan yaitu pemburukan karena pelepasan dalam (*internal discharge*) dan pemburukan elektro-kimiawi.

Apabila campuran dielektrik cair-padat mempunyai kekuatan gagal yang berbeda, maka tegangan listrik yang dianaikan akan terjadi kegagalan pada zat yang paling lemah yang disebut kegagalan parsial (*partial discharge*). Pelepasan ini menyebabkan pemburukan perlahan oleh :

- i. Aksi pemburukan elektro-kimiawi pada dielektrik karena ionisasi gas.
- ii. Suhu yang tinggi di daerah pelepasan
- iii. Disintegrasi dielektrik padat yang mengakibatkan oleh elektron.

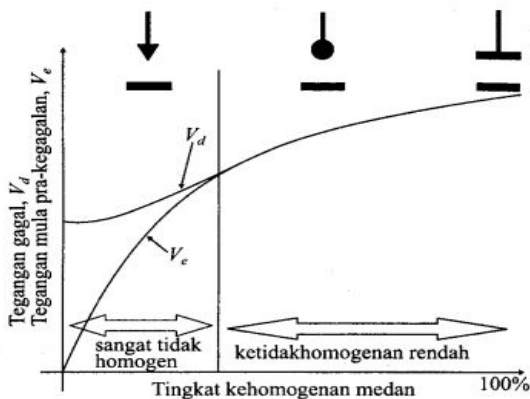
Pemburukan elektro-kimiawi dapat terjadi oleh ion-ion yang dibebaskan arus pada elektroda bisa mengakibatkan kerusakan. Tingkat

kerusakan yang terjadi tergantung pada sifat ion yang terbawah dan reaksi kimia dengan ionisasi.

2.7 Fenomena *Pre-Breakdown Voltage*

Fenomena *Pre-Breakdown Voltage* merupakan suatu fenomena yang terjadi pada proses dimana menuju kegagalan (*Breakdown Voltage*) bahas isolasi. Suatu kegagalan yang terjadi dapat disebabkan oleh beberapa faktor yaitu jenis bahan isolasi, jenis elektroda, jara sela antar elektroda, kontaminasi udara dan kekuatan dielektrik dari bahan isolasi [6]. Pada pemakaian elektroda yang memiliki bentuk tidak sama terdapat fenomena *Pre-Breakdown Voltage*, misal pada elektroda jarum-plat. Karena medan listrik akan berkumpul pada salah satu titik yang memilik bentuk runcing atau berbebtuk siku. Sehingga pada pengujian menggunakan elektroda jenis jarum-plat akan terdapat jenis kegagalan pada medan yang tidak seragam [7].

Apabila pada pengujian yang dilakukan tegangan dinaikkan sampai pada tingkat pra-peluahan akan berkembang menjadi peluahan yang dapat menghubungkan kedua elektroda tersebut. Seiring dengan meningkatnya tegangan, pada elektroda dengan tingkat ketidakhomogenan tinggi akan menyebabkan peluahan seperti streamer, korona, leader dan kegagalan. Tingkat kegagalan berdasarkan ketidakhomogenan medan dan tegangan gagal seperti yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut :



Gambar 2.12 Tegangan awal pra-kegagalan dan tegangan gagal tergantung pada tingkat kehomogenan medan.

Pada bahan isolasi minyak, awal mula fenomena *Pre-Breakdown Voltage* dimulai dengan munculnya *streamer*. Streamer dapat mengalami perkembangan sampai munculnya gelembung gas yang mempunyai permeabilitas bahan lebih rendah disekitarnya. Efek kapasitansi yang terbentuk pada rongga udara mengakibatkan intensitas medan yang besar dapat menyebabkan loncatan muatan. Loncatan muatan akan terendam kemudian mulai melakukan pengisian muatan sampai menemukan rongga lagi untuk melepaskannya kembali. Fenomena pelepasan muatan yang singkat ini dan pengisian yang lama terjadi secara berulang ini disebut sebagai fenomena *pre-breakdown voltage*.

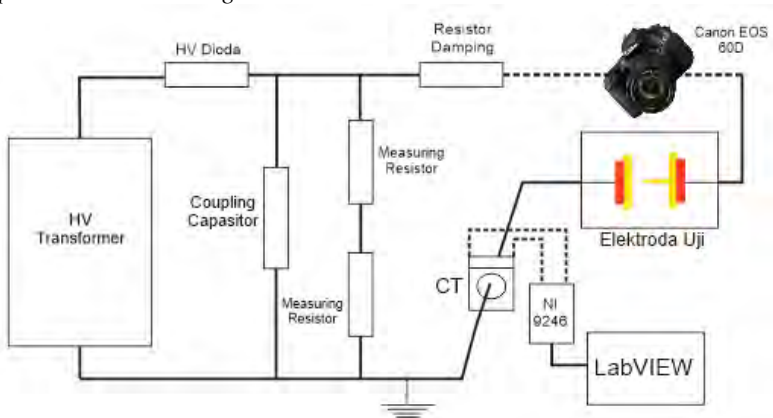
BAB III

PERALATAN UJI DAN PENGAMBILAN DATA

Pada bab ini akan membahas mengenai peralatan uji untuk mengamati karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada minyak isolasi dan melakukan proses pengambilan data.

3.1 Peralatan Uji

Alat pengujian yang dibutuhkan untuk mendapatkan karakteristik dari fenomena *pre-breakdown voltage* pada minyak isolasi. Pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 menunjukkan skema dari alat uji dan peralatan uji yang digunakan untuk mendapatkan karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage*.



Gambar 3.1 Skema alat pengujian [8]



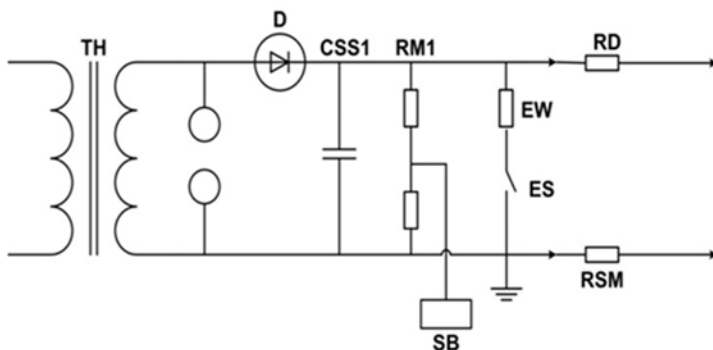
Gambar 3.2 Peralatan uji yang digunakan

Pada Gambar 3.2 diatas adalah peralatan yang digunakan untuk mendapatkan karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada minyak isolasi. Peralatan tersebut dapat dibedakan menyadi dua kategori yaitu perangkat kersa (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Perangkat keras berfungsi untuk mendapatkan berupa data dan diakuisis oleh perangkat lunak. Peralatan uji yang digunakan pada pengujian fenomena *pre-breakdown voltage* pada minyak isolasi ini terdapat tujuh komponen utama baik perangkat keras maupun perangkat lunak yaitu :

1. Pembangkitan tegangan tinggi DC
2. Elektroda uji
3. Minyak isolasi
4. CT (*Current Transformer*)
5. NI 9246
6. Komputer yang berfungsi untuk menjalankan LabVIEW
7. Canon EOS 60D

3.1.1 Pembangkitan Tegangan Tinggi DC

Dalam pengujian ini pembangkitan yang digunakan adalah pembangkitan tegangan tinggi DC yang ada di laboratorium Tegangan Tinggi Teknik Elektro ITS Surabaya. Temperatur pengujian dilakukan pada suhu kamar atau ruangan.



Gambar 3.3 Rangkaian pengganti pembangkitan tegangan tinggi DC

Pada Gambar 3.3 diatas merupakan rangkaian pengganti pembangkitan tegangan tinggi DC. Rangkaian pengganti diatas terdapat beberapa peralatan antara lain :

- High Voltage Transformer* (TH) sebagai trafo *step-up*
- Dioda (D) sebagai penyearah tegangan
- Coupling Capacitor* (CSS1) untuk mengurangi ripple tegangan
- Measuring Resistor* (RM1) sebagai range pengisian tegangan atau pembangkitan yang diberikan
- Resistor Damping* (RD) berfungsi sebagai pembagi tegangan
- Grounding* (ES) sebagai pangaman dari paralatan pembangkitan.
- Control Box* (SB) berfungsi sebagai pengatur dalam pembangkitan tegangan.

Spesifikasi pembangkitan tegangan tinggi yang digunakan pada pengujian ini dapat ditunjukkan pada tabel berikut ini :

Tabel 3.1 Spesifikasi peralatan pembangkitan tagangan tinggi DC

<i>High Voltage Transformer</i>	80 kV r ms, 5 kVA
<i>High Voltage Diode</i>	100 kV, 20 mA
<i>Coupling Capacitor</i>	100 kV, 20 mA
<i>Measuring Resistor with Test Jack</i>	200 kV DC, 800 MΩ
<i>Resistor Damping</i>	6kΩ
<i>Grounding Resistor</i>	200 kV DC, 25 kΩ
<i>Grounding Switch</i>	
<i>Control Box</i>	Type 273

3.1.2 Jenis Elektroda

Jenis elektroda yang digunakan pada pengujian ini adalah elektroda jarum dan plat yang terbuat dari tembaga dan *stainless steel*. Elektroda jarum dimanfaatkan sebagai anoda sedangkan elektroda plat sebagai katoda. Elektroda jarum memiliki diameter sebesar 1mm. Dasar pemilihan elektroda jarum-plat untuk mempermudah dalam mengamati fenomena pre-breakdown voltage yang dialami pada minyak uji. Sebab Tegangan tembus adalah tegangan dalam kV yang diperlukan untuk menembus lapisan minyak setebal 1 cm diantara 2 buah elektroda dan dinyatakan dalam kV/cm [13]. Gambar 3.4 adalah bentuk elektroda yang digunakan dalam pengujian ini.



Gambar 3.4 Elektroda uji jarum-plat

3.1.3 Jenis Minyak Isolasi

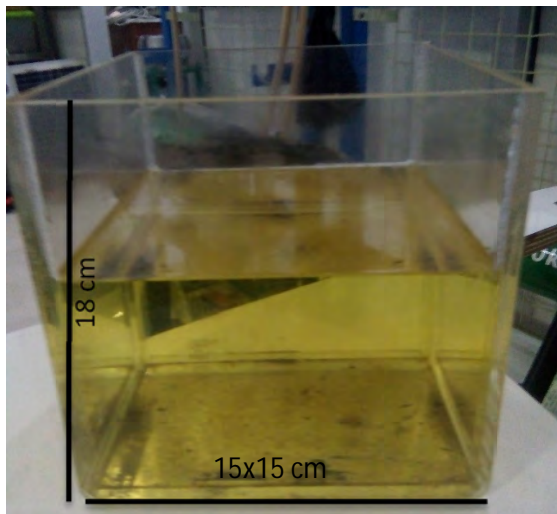
Minyak isolasi yang digunakan sebagai bahan uji adalah minyak jagung. Minyak jagung merupakan minyak isolasi cair nabati yang terbuat dari biji jagung dengan ramah lingkungan dan dapat didaur ulang. Minyak jagung di rekomendasikan sebagai bahan isolasi karena memiliki kuat dielektrik yang tinggi dan jumlah *fault gas* paling rendah [5].

Berikut adalah informasi kandungan dalam bahan isolasi minyak jagung yang digunakan pada pengujian fenomena *pre-breakdown voltage*.

Tabel 3.2 Spesifikasi kandungan dalam minyak Jagung (*CCO Corn Oil*)

Kandungan dalam Minyak Jagung	% AKG
Lemak jenuh 1,5g	8%
Lemak trans 0 g	0%
Lemak total 10g	16%
Kolesterol 0 mg	0%
Vitamin E	10%
Energi dan lemak 100kkal	-

Dalam pengujian ini yang dibutuhkan minyak jagung 1,5 liter. Minyak tersebut dituangkan kedalam wadah pengujian yang terbuat dari bahan akrilik. Wadah akrilik yang berukuran 15x15x18 cm yang memiliki ketebalan 5 inchi. Pada Gambar 3.5 merupakan bahan isolasi minyak jagung dituangkan dalam tabung atau wadah akrilik.



Gambar 3.5 Minyak uji dalam tabung akrilik

3.1.4 Akuisisi Data

Peralatan akuisisi data yang digunakan pada pengujian ini adalah NI 9246 dan CT (*Carrent Transformer*). *Current Transformer* atau trafo arus sebagai peralatan sistem tenaga yang dapat mengubah skala arus listrik pada saat pengukuran arus. Trafo arus digunakan sebagai penyambung dengan alat akuisisi data berupa NI 9246.

Spesifikasi *Current Transformer* (CT) yang digunakan pada pengujian ini ditunjukkan pada tabel dibawah ini :

Tabel 3.3 Spesifikasi *Current Transformer* (CT)

Jenis CT	Powell MSQ-30
Rasio CT	250/5
Class CT	1
Burden CT	5
Range Frekuensi	50-60 Hz

Untuk mengakuisisi data berupa arus pada pengujian ini menggunakan NI 9246 yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 3.6 NI 9246 Akuisisi data arus

NI 9246 adalah *Compact DAQ* atau *Analogue Input Module* dapat digunakan sebagai akuisisi data arus.

3.2 Pengambilan Data

Pengambilan data pada pengujian fenomena pre-breakdown voltage ini dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Teknik Elektro ITS dengan melakukan pengujian tembus tegangan (*breakdown voltage*) skala laboratorium. Pembangkitan yang digunakan dalam pengujian ini adalah pembangkitan tegangan tinggi DC sebagai sumber tegangan yang terhubung dengan pengujian minyak isolasi. Akuisisi data berupa arus

dan representasi berupa gambar dimana saat fenomena *pre-breakdown voltage* terjadi.

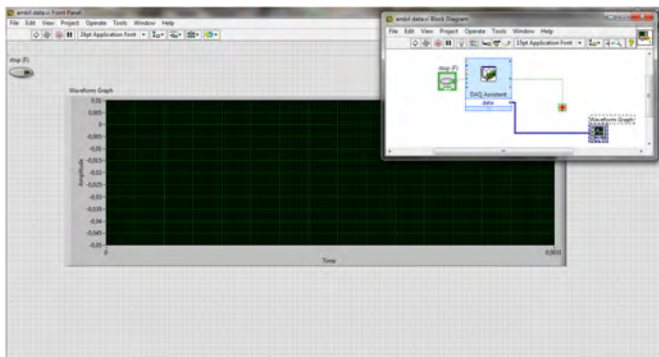
3.2.1 Akuisisi Data

Untuk akuisisi data pada pengujian ini menggunakan perangkat keras NI 9246 yang terhubung dengan komputer yang dilengkapi dengan perangkat lunak LabVIEW untuk merekam bentuk arus saat terjadi perubahan arus. LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) merupakan perangkat lunak yang menggunakan bahasa pemrograman berbasis grafis yang dapat dikembangkan dari National Instrumen untuk menciptakan sebuah aplikasi akuisisi data.

Pada penelitian ini, *software* LabVIEW digunakan sebagai instrumentasi virtual agar mempermudah dalam pengambilan data secara otomatis *hardware* eksternal seperti cDAQ yang berfungsi sebagai akuisisi data arus. LabVIEW ini menjalankan program berdasarkan alur yang dibuat oleh user dan bahasa pemrograman berupa blok diagram didalamnya. LabVIEW LabVIEW mendapatkan data dari perangkat *hardware* eksternal yang selanjutnya dapat dilakukan data logging atau perekaman data dan pengolahan data dengan file berformat tdms. Hasil pengukuran yang diperoleh selanjutnya akan ditampilkan pada front panel LabVIEW melalui layar PC komputer.

Akuisisi data ini mulai dijalankan saat minyak telah menunjukkan tanda-tanda akan terjadi *breakdown voltage* misal adanya desis dan nilai tegangan pembangkitan mendekati *breakdown voltage*. Maka data yang terekam hanya data sesaat sebelum terjadi tegangan tembus. Pada saat akuisisi data, data yang diperoleh secara otomatis akan tersimpan pada data *logging* LabVIEW.

Pada Gambar 3.6 adalah hasil pengukuran yang diperoleh kemudian ditampilkan melalui front panel LabVIEW pada layar komputer seperti dibawah ini :



Gambar 3.7 Tampilan front panel dan block diagram pada LabVIEW.

Pada proses pengambilan data, keluaran data dari data logging pada alat akuisisi data yang dilakukan adalah dalam bentuk format '.tdms'. Sehingga memerlukan sebuah perangkat lunak yang lain agar dapat membaca dan mengelola data keluaran dari proses akuisisi data. Sebuah perangkat lunak yang dapat membantu dalam pemotongan sinyal akan di filter yaitu perangkat lunak DIAdem. Perlunya pemotongan sinyal dilakukan karena pada saat pengambilan data sampling, data yang tersimpan lebih banyak.

Data dalam DIAdem dengan format '.tdms' maka hasil keluaran dari LabVIEW dapat ditampilkan dalam bentuk sinyal arus (I) yang berisikan nilai amplitudo dari masing-masing sampling yang terbagi pada kanal sesuai dengan jumlah sampling saat pengambilan data. Pemotongan sinyal dilakukan dengan cara mengambil nilai dari kanal DIAdem.

3.2.2 Pengambilan Gambar

Pengambilan gambar pada pengujian fenomena *pre-breakdown voltage* ini untuk mengetahui minyak isolasi saat terjadi kenaikan tegangan dan akuisisi data yang menunjukkan adanya perubahan arus. Kamera yang digunakan untuk pengambilan gambar pada pengujian ini adalah kamera beresolusi tinggi agar mendapatkan hasil yang terlihat dengan jelas. Spesifikasi kamera yang digunakan adalah kecepatan pengambilan gambar 5 frame gambar per detik.

Pengambilan gambar ini dilakukan pada saat minyak isolasi mulai menunjukkan tanda-tanda akan terjadi tembus tegangan (*Breakdown Voltage*) seperti adanya desis dan nilai tegangan mendekati nilai tembus

tegangan (*breakdown voltage*) dan metode yang digunakan adalah pengambilan gambar secara bertahap. Sehingga data yang terekam adalah data sebelum *breakdaown voltage* yang disebut fnomena *Pre breakdown voltage* sampai tembus tegangan (*breakdown voltage*).

Teknik pengambilan gambar sebanyak 5 gambar dalam waktu 1 detik. Sehingga didapatkan hasil gambar yang cukup banyak dalam proses pengambilan gambar ini. Sebab, proses akuisisi data dan pengambilan gambar dilakukan secara bersama-sama agar hasil yang didapatkan dapat dilihat dan disesuaikan dengan arus yang terukur.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

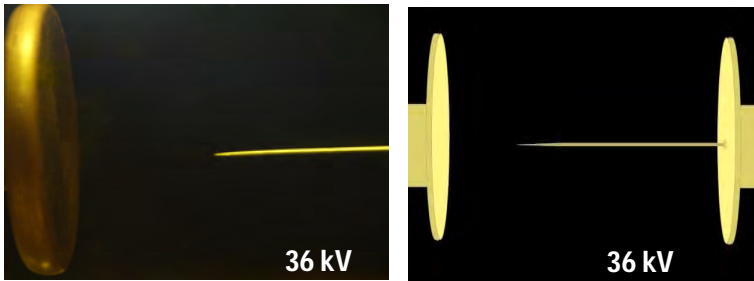
ANALISA DATA

4.1 Mekanisme Terjadi Fenomena *Pre-Breakdown Voltage* pada Bahan Isolasi Minyak

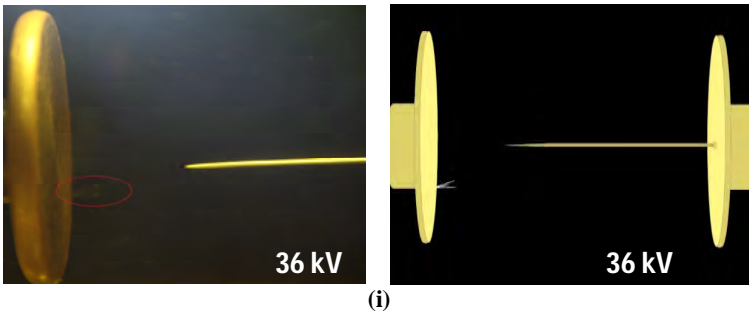
Proses pengambilan data mekanisme yang terjadi pada fenomena *pre-breakdown voltage* yang menunjukkan proses menuju kegagalan bahan isolasi minyak. Proses pengambilan data menggunakan kamera yang beresolusi tinggi canon EOS 60D untuk mengambil data berupa gambar, kemudian mengamati perubahan pada minyak isolasi ketika pengujian berlangsung. Menbangkitkan tegangan tinggi DC sebagai sumber tegangan yang disambungkan dengan modul pengujian yang dilengkapi elektroda dan minyak isolasi yang diletakan dalam wadah pengujian. Tegangan dinaikan secara bertahap dengan memutar *charging range* pada *control box*. Proses ini berlangsung sampai minyak isolasi yang diuji mulai menunjukkan desis dan pergerakan minyak berupa gelembung udara.

4.1.1 Tegangan Dibangkitkan secara Kontinyu

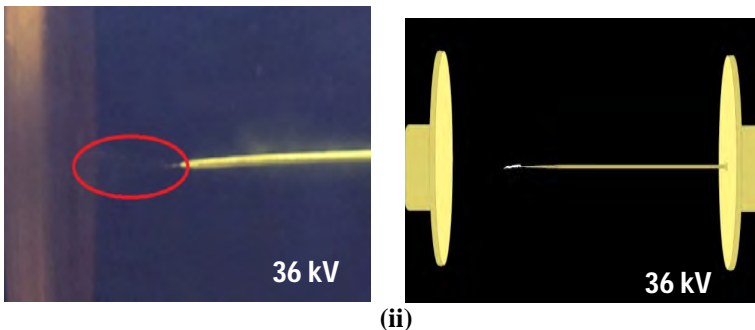
Tegangan yang dibangkitkan pada pengujian ini adalah pembangkitan tegangan tinggi DC. Tegangan dinaikan sebesar 2kV tiap ± 10 detik secara bertahap. Kenaikan tegangan ini dilakukan agar mempercepat proses munculnya fenomena *pre-breakdown voltage* pada bahan isolasi minyak jagung yang diuji. Hasil yang didapatkan dari pengujian ini adalah suatu perubahan pada kondisi minyak uji mulai terjadi pada nilai tegangan sebesar 36 kV. Sehingga pengambilan data berupa gambar dilakukan mulai pada nilai tegangan di 36 kV. Gambar-gambar yang ada di bawah merupakan gambar saat perubahan kondisi minyak berlangsung ketika tegangan pembangkitan sebesar 36 kV. Sebelum ada tanda-tanda terjadinya perubahan pada kondisi minyak isolasi minyak terlihat pada Gambar 4.1 di bawah ini. Tetapi perubahan terjadi sangat cepat pada minyak isolasi terbentuk jenbatan serat di antara kedua elektroda terlihat pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.1 Sebelum ada perubahan kondisi pada minyak isolasi



(i)

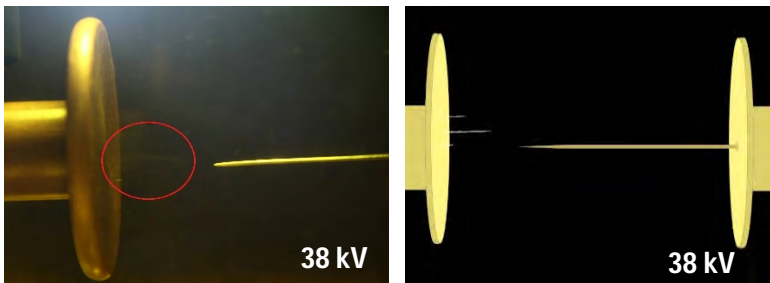


(ii)

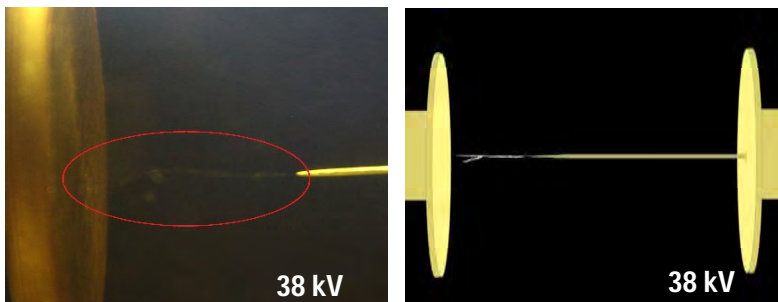
Gambar 4.2 Perubahan pada minyak dengan tegangan 36 kV (i). Kondisi minyak isolasi mengalami perubahan di antara kedua elektroda (ii), mulai terbentuk *streamer* pada minyak uji.

Tegangan sebelumnya dari 36 kV dinaikan sebesar 2 kV, maka tegangan menjadi 38 kV selama ± 10 detik mengambil gambar. Sehingga gambar yang didapat oleh kamera mengalami perubahan

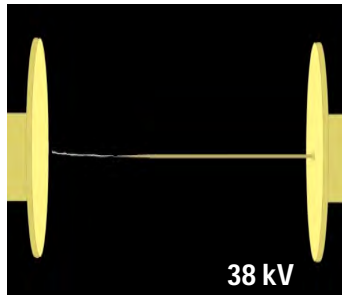
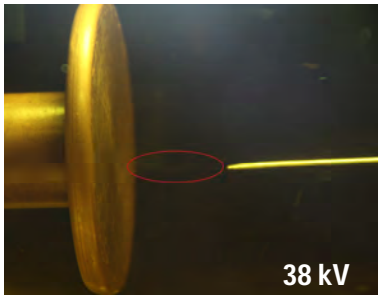
berkembangnya jembatan serat di antara kedua elektroda jarum-plat. Karena adanya medan listrik yang sangat besar dapat mengakibatkan efek polaritas, hingga mulai terbentuknya gelembung gas pada minyak isolasi. Gelembung gas yang terbentuk adalah molekul uap air yang dapat memisahkan dari minyak isolasi. Apabila jumlah gelembung gas semakin banyak akan menimbulkan kanal peluahan yang nantinya kanal tersebut dapat merambat hingga terbentuk suatu jembatan serat pada antara kedua elektroda dalam minyak.



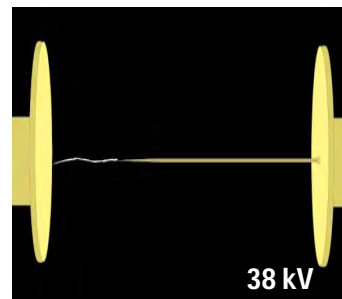
(i)



(ii)



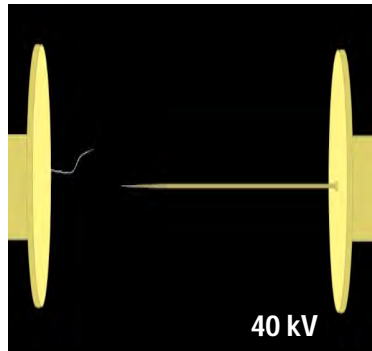
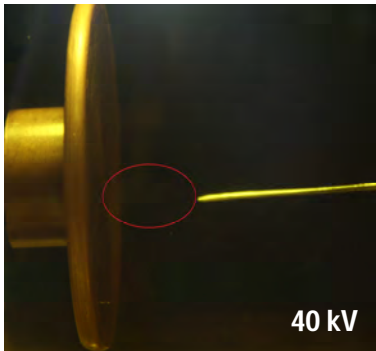
(iii)



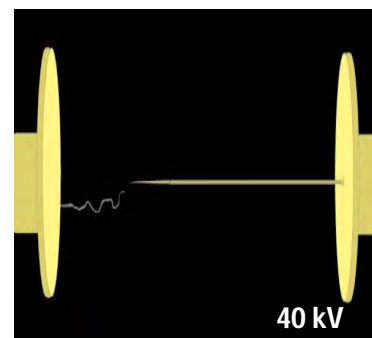
(iv)

Gambar 4.3 Perubahan kondisi minyak pada tegangan 28 kV (i). perkembangan *streamer* (ii). terlihat dengan jelas perkembangan *streamer* (iii). gelembung gas mulai terbentuk (iv). makin banyak gelembung gas yang terbentuk.

Berikutnya tegangan pembangkitan dari 38 kV dinaikan sebesar 2 kV menjadi 40 kV, pada tegangan ini juga mengalami perubahan pada minyak hingga terjadi tembus tegangan (*breakdown voltage*). Sebab pada tegangan 38 kV ada faktor yang dapat mempengaruhi kegagalan suatu bahan isolasi minyak adalah gelembung gas. Kondisi ini terlihat bahwa gelembung yang terbentuk mulai terurai karena ada stress tegangan yang terlalu tinggi.



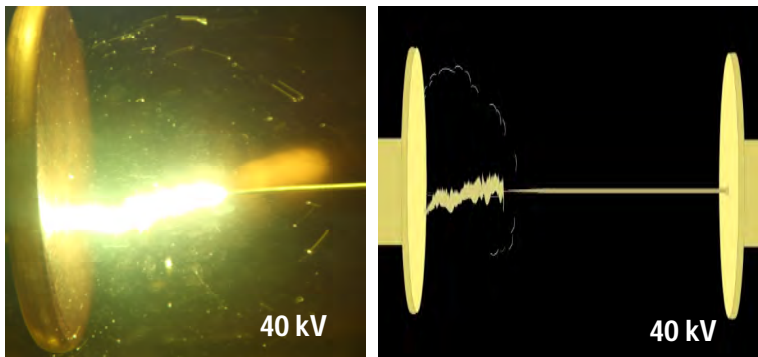
(i)



(ii)

Gambar 4.4 Perubahan kondisi minyak isolasi pada tegangan 40 kV (i). gelembung gas terurai (ii) gelembung gas terurai dan akan terjadi *breakdown voltage*.

Seiring dengan terurai gelembung gas pada minyak isolasi dengan tegangan pembangkitan 40 kV terjadi tembus tegangan (*breakdown voltage*). Sehingga terjadi fenomena pre-breakdown voltage sampai pada nilai tegangan sebesar 40 kV dalam waktu yang sangat singkat. Kemudian gelembung gas terurai terjadi perubahan kondisi minyak isolasi yaitu dengan bunyi lecutan dan nyala api pada minyak.



Gambar 4.5 Tegangan tembus (*breakdown voltage*)

Nilai pembangkitan tegangan yang diberikan juga sangat mempengaruhi lamanya waktu untuk perubahan kondisi pada minyak isolasi. Selain itu juga ketidakmurnian minyak uji dapat mempengaruhi terjadinya kegagalan dan fenomena *pre-breakdown voltage*, karena minyak uji tidak tertutup dengan rapat.

4.2 Karakteristik Arus Fenomena *Pre-breakdown Voltage* pada Bahan Isolasi Minyak

Untuk mengetahui karakteristik arus fenomena *pre-breakdown voltage* adalah melakukan pengujian tembus tegangan (*breakdown voltage*) pada minyak isolasi. Karakteristik arus yang didapatkan dari pengujian ini berupa akuisisi data yang dapat terekam oleh LabVIEW dan representasinya berupa gambar dapat terekam kamera. Minyak isolasi yang digunakan pada pengujian ini adalah menggunakan minyak jagung.

Jika suatu bahan isolasi minyak diberi tegangan dapat menyebabkan perpindahan elektron-elektron dari satu molekul ke molekul lainnya. Apabila tegangan yang diberikan pada bahan isolasi secara kontinyu maka bahan isolasi tersebut tidak mampu menahan tegangan yang sangat tinggi. Sehingga kondisi ini dapat menimbulkan adanya stress tegangan pada isolasi tersebut hingga timbul arus konduksi.

Pada pengujian tembus tegangan (*breakdown voltage*) yang dilakukan pada minyak uji. Hasil yang didapatkan tembus tegangan (*breakdown voltage*) pada minyak jagung adalah pada pembangkitan tegangan tinggi DC sebesar 40 kV. Data arus yang dapat direkam mulai

saat nilai tegangan sebesar 36 kV hingga 40 kV. Data yang didapat berupa arus dalam bentuk grafik yang terdapat pada Gambar 4.6 dibawah. Pada gambar grafik tersebut terlihat bahwa kenaikan arus terjadi sesaat sebelum terjadinya *breakdown voltage*. Hal tersebut dapat menunjukkan perpindahan elektron yang menyebabkan adanya arus konduksi sehingga menunjukkan terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage*. Data arus yang terukur pada alat akuisisi data dapat di cocokkan dengan gambar yang terekam pada kamera. Berikut ini merupakan hasil pencocokan dari arus yang terukur dengan fenomena yang terjadi pada bahan isolai minyak jagung.

Berikut adalah hasil asil pengujian pada tabel 4.1 dibawah ini. Nilai hasil pengujian yang tersaji pada tabel dibawah ini hanya dicuplik beberapa kondisi saja ketika bentuk sinyak menunjukkan adanya arus yang terekam.

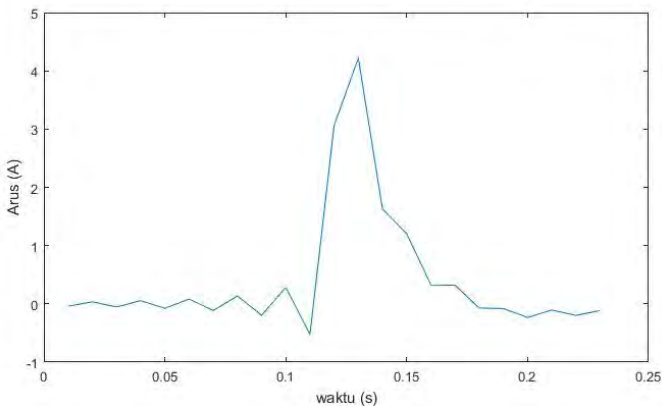
Tabel 4.1 Sebagian data hasil pengujian

Tegangan (kV)	Arus (A)	Keterangan
36	0	Sebelum <i>Breakdown</i>
36	0,011758344	Sebelum <i>Breakdown</i>
36	0,0119088	Sebelum <i>Breakdown</i>
36	0,012059256	Sebelum <i>Breakdown</i>
36	0,012360168	Sebelum <i>Breakdown</i>
36	0,013450974	Sebelum <i>Breakdown</i>
38	0,013112448	Sebelum <i>Breakdown</i>
38	0,010103328	Sebelum <i>Breakdown</i>
38	0,01284915	Sebelum <i>Breakdown</i>
38	0,01266108	Sebelum <i>Breakdown</i>
38	0,012322554	Sebelum <i>Breakdown</i>
40	0,136260684	Sebelum <i>Breakdown</i>
40	-0,195795708	Sebelum <i>Breakdown</i>
40	0,28160118	Sebelum <i>Breakdown</i>
40	-0,523451262	Sebelum <i>Breakdown</i>
40	3,06578946	Tejadi <i>Breakdown</i>
40	4,217041158	Saat terjadi <i>Breakdown</i>
40	1,626640206	Setelah <i>Breakdown</i>
40	1,202918496	Setelah <i>Breakdown</i>
40	0,327151734	Setelah <i>Breakdown</i>
40	0,318500514	Setelah <i>Breakdown</i>

Data yang ditampilkan pada tabel 4.1 diatas menunjukkan bahwa adanya perubahan arus yang terukur pada alat akuisisi data yang disebut

arus konduksi atau arus bocor. Data tersebut hasil cuplikan yang dilakukan dari pengolahan data.

Data pada tabel 4.1 diatas disajikan dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 berikut



Gambar 4.6 Grafik arus hasil pengujian dengan nilai arus yang terukur.

Pada Gambar 4.6, data arus berupa grafik telah diolah dan disesuaikan dengan fenomena yang terjadi pada minyak yang terekam oleh kamera. Pada Gambar 4.7 dibawah merupakan hasil gambar ulang menggunakan software photoshop dari gambar yang terekam pada kamera, kemudian disinkronkan dengan data arus sehingga diketahui bentuk fenomena yang terjadi ketika adanya perubahan nilai arus yang terukur pada alat akuisisi data. Tabel 4.2 dibawah ini merupakan tabel yang menyajikan nilai arus yang terukur.

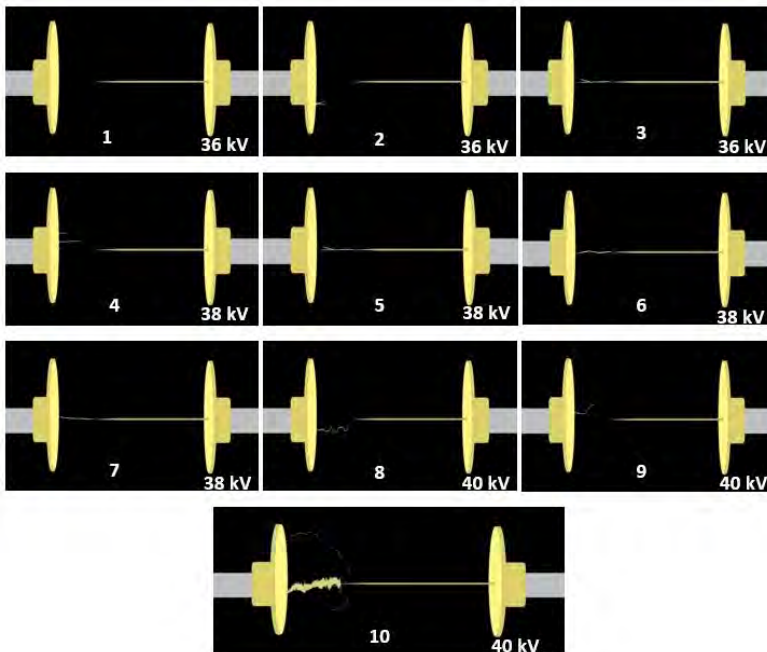
Tabel 4.2 Arus yang terukur ketika kondisi minyak mengalami perubahan

Kondisi minyak	Tegangan Pembangkitan (kV)	Arus Terukur (A)
1	36	0,011758344
2	36	0,012059256
3	36	0,013450974
4	38	0,013112448
5	38	0,01284915
6	38	0,01266108
7	38	0,012322554

Tabel 4.2 Arus yang terukur ketika kondisi minyak mengalami perubahan (*lanjutan*)

8	40	0,28160118
9	40	3,06578946
10	40	4,217041158

Pada tabel 4.2 diatas yang di maksud kondisi minyak 1-10 adalah kondisi dimana fenomena atau munculnya streamer pada salah satu elektroda. Kemudian streamer dapat berkembang hingga kondisi minyak mengalami breakdown. Untuk lebih jelasnya terdapat pada gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Proses terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage* pada minyak isolasi yang disesuaikan dengan arus yang terukur.

Pada gambar 4.7 diatas merupakan penjelasan dari tahapan terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage*. Penjelasan diatas dapat

diketahui bahwa fenomena *pre-breakdown voltage* dapat terjadi dan diamati pada bahan isolasi minyak dengan menggunakan elektroda jarum-plat. Akhirnya, dengan diketahuinya fenomena ini, kegagalan pada isolasi minyak dapat dideteksi sejak awal sebelum terjadinya kegagalan yang sesungguhnya.

4.3 Perbandingan Karakteristik Fenomena Pre-Breakdown Voltage Pada Isolasi Cair

Dari hasil pengujian dapat menunjukkan bahwa fenomena pre-breakdown yang terjadi pada bahan isolasi minyak jagung adalah dengan pembangkitan tegangan antara 36kV hingga 40kV. Kemudian nilai arus yang terukur pada alat akuisisi data ketika terjadi fenomena tersebut adalah 130 mA - 280 mA. Apabila dibandingkan dengan karakteristik fenomena pre-breakdown voltage dengan bahan isolasi minyak Shel Diala B pada tegangan pembangkitan antara 28 kV hingga 30 kV dan nilai arus yang terukur pada akuisisi data ketika terjadi fenomena ini adalah 100 mA - 150 mA [8].

Perbandingan dari kedua bahan isolasi cair ini dapat di ketahui dengan sangat mudah. Tegangan tembus dari masing-masing bahan isolasi cair dan data arus yang terukur berbeda dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti jarak elektroda, jenis dan kondisi minyak (bekas pakai dan baru).

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Akhir dari eksperimen fenomena pre-breakdown voltage pada bahan isolasi minyak ini, didapatkan beberapa kesimpulan yaitu :

1. Minyak jagung dikategorikan sebagai bahan isolasi cair karena memenuhi standar yang diterima secara internasional yaitu ASTM D-1816 suatu bahan isolasi harus mampu menahan tegangan sebesar 28 kV untuk satu lebar sela elektroda sebesar 1,02 mm [2].
2. Kondisi minyak pada saat pengujian mengalami perubahan dapat menunjukan bahwa adanya suatu fenomena pre-breakdown voltage pada minyak isolasi.
3. Gelembung gas yang terdapat pada minyak isolasi saat pengujian menunjukkan bahwa akan terjadi tembus tegangan (*breakdown voltage*).
4. Terjadinya fenomena pre-breakdown voltage sesuai pengujian yang dilakukan nilai rata-rata pada tegangan 38kV hingga 40 kV dengan nilai arusnya 130 – 280 mA. Hasil ini dikhususkan pada bentuk elektroda jarum-plat dengan jarak elektroda 1 cm.
5. Proses terjadinya pre-breakdown voltage pada minyak isolasi merupakan suatu fenomena yang terjadi sesaat sebelum terjadinya kegagalan dan berlangsung dalam waktu yang sangat singkat.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya bisa dilakukan dengan alat perekam otomatis dan gunakan bahan isolasi yang berbeda kemudian sinkronisasi data.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Made Yudhi Setyawan, “Pengaruh Bentuk dan Jumlah Partikel Terhadap Karakteristik Partial Discharge dan Tegangan Tembus Isolasi Minyak Pada Medan Seragam”, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).
- [2] Muhammad Suyanto, “Karateristik Pengujian Minyak Nabati Sebagai Alternatif Isolasi Pengganti Minyak Transformator Distribusi 20 Kv” Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST) 2014 Yogyakarta, 15 November 2014
- [3] T.V. Oommed, Consultant, Raleigh, SC, U.S.A ” Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers”, IEEE Electrical Insulation Magazine.
- [4] Rahayu, Kholinda and Irnanda, Priyadi and Yenni , Suhartini (2013) “Analisis Karakteristik Dielektrik Minyak Jagung Sebagai Alternatif Bahan Isolasi Cair”. Undergraduated thesis, Fakultas Teknik Universitas Bengkulu
- [5] Guido Dias Kalandro, “Dissolved Gas Analysis (DGA) Pada Minyak Jagung Dan Minyak Kelapa Sebagai Minyak Trafo Alternatif” Fakultas Teknik UGM, 2014.
- [6] Henry B. H. Sitorus, Abdarrahmane Beroual, Rudi Setiabudy dan Setijo Bismo, “Pre-breakdown Phenomena in New Vegetable Oil - based Jatropha Curcas Seeds as Substitute of Mineral Oil in High Voltage Equipment”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 5; October 2015.
- [7] Negara, I Made Yulistya, “Teknik Tegangan Tiggi; Prinsip dan Aplikasinya” -Edisi Pertama - Yogyakarta; Graha Ilmu, 2013
- [8] Dwi Krisna Cahyaningrum, “Analisis Karakteristik Fenomena Pre-Breakdown Voltage Berbasis Pengujian pada Media Isolasi Minyak”, Jurnal Teknik ITS Vol. 4, No. 1 , (2015)
- [9] Melda Latif, “Pengaruh Temperatur Terhadap Kekuatan Dielektrik Minyak Nabati Sebagai Bahan Isolasi Transformator Daya”, No. 30 Vol.1 Thn. XV November 2008.
- [10] Benito Arief Nugroho, Syahrawardi, “Pengaruh Persentase Fenol Terhadap Kekuatan Dielektrik Minyak Jagung”, VOL. 1 NO. 2/Februari 2013.
- [11] Naidu M.S. dan Kamaraju V, 2002. High Voltage Engineering Third Edition, Mc. Graw Hill, Boston

- [12] Wijaya, I Made Indra, “*Karakteristik Korona dan Tegangan Tembus Isolasi Minyak pada Konfigurasi Elektroda Jarum-Plat*”, Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. 2010
- [13] Rendi Kamerlisa Putra “*Karakteristik Tegangan Tembus Arus Bolak-Balik Pada Minyak Jarak Pagar (*Jatropha Curcas*) sebagai alternatif isolasi cair*” Jom FTEKNIK Volume 4 N0. 2 Oktober 2017.

RIWAYAT HIDUP



Saya **Eber Wonda**, lahirkan di sebuah padalam provinsi papua tepanya di Mulia, 03 Juni 1994. Riwayat pendidikan penulis yaitu, SD Inpres Pruleme, kabupaten Puncak Jaya, Provinsi Papua (lulus 2006). Dilanjutkan sekolah menengah pertama SMPN 1 Mulia, Puncak Jaya lulus tahun 2009. Tahun 2012 lulus dari SMAN 1 Mulia. Kemudian melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2012. Selama kuliah, penulis aktif di organisasi Kalpataru. Selain aktif di organisasi kampus, penulis juga aktif sebagai bendahara umum IPMAPA (Ikatan Pelajar dan Mahasiswa Papua) Se_Surabaya tahun 2013-2015 dan aktif sebagai ketua kowril IPMAPUJA (Ikatan Pelajar dan Mahasiswa Puncak Jaya) Surabaya tahun 2014-2017. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email eberwonda.12@gmail.com.